

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 04-147001

(43)Date of publication of application : 20.05.1992

(51)Int.Cl.

G01B 11/24

(21)Application number : 02-269480

(71)Applicant : YOSHIZAWA TORU

(22)Date of filing : 09.10.1990

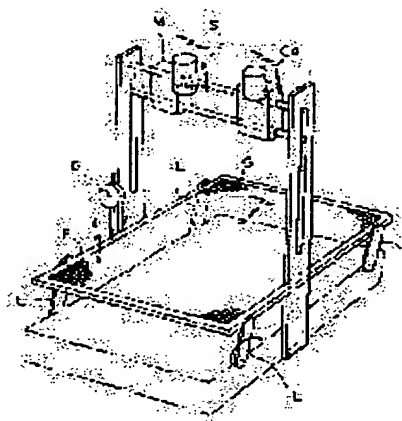
(72)Inventor : YOSHIZAWA TORU

(54) METHOD FOR THREE-DIMENSIONAL MEASUREMENT WITH HIGH SENSITIVITY BY STEREO-LATTICE TYPE MOIRE TOPOGRAPHY**(57)Abstract:**

PURPOSE: To enable execution of three-dimensional measurement with high sensitivity by a method wherein a lattice is moved in the direction vertical to the surface of the lattice, while a light source is moved in parallel to the lattice surface and shifted in a state wherein moire fringes of each degree are made uniform, and the moire fringes are picked up and subjected to a computation processing.

CONSTITUTION: A halogen lamp is used for a light source S, and a micrometer is fitted to a light source differential motion mechanism element M and moved on a horizontal plane. Besides, the light source S is adjusted in a height direction so that the central position of the light source S be aligned with the focal position of a CCD camera Ca. Then, positional alignment of the center of the light source S with the focus of the camera Ca is conducted and a distance between the light source S and the camera Ca is set so that a fringe interval being suitable for measurement be obtained. The

amounts of shift of a lattice G and the light source S are calculated with respect to four phases of 0, $\delta/2$, δ and $3\delta/2$ by a prescribed formula, both of them are shifted four times and images of moire fringes are picked up by the camera Ca. On the occasion, the lattice G is moved within a plane and thereby an averaging process of the moire fringes is executed. In this way, three-dimensional measurement with high sensitivity can be executed.

**LEGAL STATUS**

[Date of request for examination]

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision
of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's
decision of rejection]

[Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998,2003 Japan Patent Office



519990184402887517

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 特 許 公 報 (B 2)

(11) 特許番号

第2887517号

(45) 発行日 平成11年(1999) 4月26日

(24) 登録日 平成11年(1999) 2月19日

(51) Int.Cl.⁶

識別記号

F I

G 0 1 B 11/24

G 0 1 B 11/24

E

請求項の数1(全 7 頁)

(21) 出願番号 特願平2-269480

(22) 出願日 平成2年(1990)10月9日

(65) 公開番号 特開平4-147001

(43) 公開日 平成4年(1992)5月20日

審査請求日 平成9年(1997)9月9日

(73) 特許権者 999999999

吉澤 徹

東京都府中市新町1-19-5 府中第二

住宅1-102

(72) 発明者 吉澤 徹

東京都府中市新町1-19-5 府中第二

住宅1-102

(74) 代理人 弁理士 樋口 盛之助 (外1名)

審査官 白石 光男

(58) 調査した分野(Int.Cl.⁶, D B 名)

G01B 11/00 - 11/30

(54) 【発明の名称】 実体格子型の実体格子型モアレトポグラフィーによる高感度三次元測定法

1

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】 測定対象から適宜離隔して配置される格子
に対し、当該格子を挟んで前記対象と対峙する側に、適
宜の光源と前記格子に平行な面上で前記光源から適宜距
離で離れた観察点とを配置し、前記光源により測定対象
に投影される前記格子の影と前記格子とにより形成され
るモアレ縞を観察する実体格子型の実体格子型モアレト
ポグラフィーによる三次元測定法において、前記格子を、その格子
面に対して垂直方向に移動させると共に、前記光源又は
観察点を格子面と平行に移動させることにより、各次数
のモアレ縞の位相をそれらがほぼ揃った状態でシフトさ
せ、位相シフトされるモアレ縞をとらえて計算処理する
ことを特徴とする実体格子型の実体格子型モアレトポ
グラフィーによる高感度三次元測定法。

【発明の詳細な説明】

2

【産業上の利用分野】

本発明は実体格子型の実体格子型モアレトポグラフィーを利用し
た高感度な三次元測定法に関するものである。

【従来の技術】

モアレトポグラフィーを利用した三次元測定法（以
下、モアレ法という）には、実体格子型と格子投影型が
あり、いずれも対象に表示させるモアレ等高線によっ
て、直観的に三次元形状をとらえることができること
から、様々な分野、とくに生体関連分野において広く利
用されている。

【発明が解決しようとする課題】

従来、測定対象に表わされるモアレ縞等高線を写真機
あるいはテレビカメラ等により撮影すれば、これによ
って対象の三次元形状を直観的に把握することはでき
るが、(イ)一枚のモアレ写真からでは面の凹凸の判定が

3

し難い、(ロ)測定感度がやや低いため、高感度の三次元測定には不向き(因に、現時点ではモアレ縞等高線の間隔は $10\mu\text{m}$ 程度が限界とされている)、(ハ)モアレ縞のビジビリティーが縞ごとに均一でないためモアレ像を画像処理の対象として扱いにくい等々の問題が指摘されている。

この問題点は、格子投影型のモアレ法の場合、二枚の格子を利用しているために、その一方を移動させることにより、縞走査、つまり、モアレ縞等高線の位相をシフトさせることによって、等高線間隔を等価的に細かく分割するとともに、対象の凹凸判定や測定感度の向上に寄与することが解明されているが、実体格子型のモアレ法の場合には格子が一枚であるため、格子投影型のモアレ法のような位相シフトを行っても、すべての次数の縞等高線の位相を揃えずに位相を変えることはできない。

本発明はこのような点に鑑み、実体格子型のモアレ法において位相シフトを導入した高感度の三次元測定法を開発することを課題としてなされたものである。

ここで、格子投影型のモアレ法とは、第6図に示すように、投影用と観察用とに、それぞれ小さな格子 G_1, G_2 を配置し、 G_1 をレンズ L_1 により物体に投影し、物体形状に応じて変形した格子線をレンズ L_2 を通じてもう一つの格子 G_2 上に結像させ、縞等高線を基準面から所定距離のところを生じさせるようにしたものである。

一方、実体格子型のモアレ法とは、第7図に示すように、基準面に一つの格子 G を設置し、第6図のレンズ L_1 の位置に点光源 S_1 を、レンズ L_2 の位置に観察眼 e を置いて、前記格子 G の光源 S_1 による影を物体上に落とし、物体形状に応じて変形した格子 G の影を形成させてこれを格子 G を通して観察することにより、この格子 G と変形した格子の影とによって生じるモアレ縞を観測する方法をいう。

〔課題を解決するための手段〕

$$hn = \frac{\ell np}{d - np} \quad (1.1)$$

であるから、

$$hn' = \frac{(\ell + \Delta \ell) np}{d - \Delta d - np} \quad (1.2)$$

となる。

一方、格子移動前の格子から $n+1$ の次のモアレ縞ま

$$hn+1 = \frac{\ell (n+1) p}{d - (n+1) p} \quad (1.3)$$

となる。

ここで、格子移動前の n 次と $n+1$ 次のモアレ縞間の位相 ϕ の位置に、格子移動後の n 次のモアレ縞があるとすると、第2図より、

$$hn + (hn+1 - hn) (\phi/2\pi) = hn' + \Delta l \quad (1.4)$$

4

上記の課題を解決することを目的としてなされた本発明方法の構成は、測定対象から適宜離隔して配置される格子に対し、当該格子を挟んで前記対象と対峙する側に、適宜の光源と前記格子に平行な面上で前記光源から適宜距離で離れた観察点とを配置し、前記光源により測定対象に投影される前記格子の影と前記格子とにより形成されるモアレ縞を観察する実体格子型のモアレポトグラフィによる三次元測定法において、前記格子を、その格子面に対して垂直方向に移動させると共に、前記光源又は観察点を格子面と平行に移動させることにより、各次数のモアレ縞の位相をそれらがほぼ揃った状態でシフトさせ、位相シフトされるモアレ縞をとらえて計算処理観察することを特徴とするものである。

〔作用〕

格子面の垂直移動と光源又は観察点の水平移動を、同時に行うことにより、各次数のモアレ縞の位相にほぼ大きな変化を来すことなく、各次数の縞の位相がほぼ揃った状態で測定対象に対する縞位相のシフトができるので、複数枚の縞画像を高速査法(位相シフト法)の原理に基いて処理することができ、これによって測定対象に対するモアレ縞による測定点の密度が増大するとともに、モアレ縞1周期について約 $1/40 \sim 1/100$ 程度の物理的な分割が可能となり、実体格子型のモアレ法では困難とされていた面の凹凸の判定や測定感度の向上を図ることができる。

〔実施例〕

次に、本発明方法について、その原理、並びに、この方法を実施するための装置の一例を説明する。

第1図において、光源 S と格子 G をそれぞれ $\Delta d, \Delta l$ だけ移動させたときの格子 G から n 番目のモアレ縞までの距離を hn' とすると、これらを移動させる前の格子 G から n 番目のモアレ縞までの距離 hn は、

での距離 $hn+1$ は、式(1.1)と比較して

と表される。

式(1.1)、(1.2)、(1.3)を式(1.4)へそれぞれ代入して分母をはらい、 n の階乗について整理すると、

$$n^2 \cdot f(1, \Delta l, d, \Delta d, p) + n \cdot g(1, \Delta l, d, \Delta d, p, \phi)$$

5

$$+h(1, \Delta l, d, \Delta d, p, \phi) = 0 \quad (1.5)$$

となる。

式 (1.4) が縞次数 n に関係なく成立するためには、すなわち縞次数 n に関係なく位相をそろえてモアレ縞をシフトさせるためには、式 (1.5) において n の係数項がすべて 0 とならなければならない、よって

$$\Delta d = \frac{\Delta \ell d}{\ell + \Delta \ell} \quad (1.9)$$

$$\Delta d = \frac{\ell dp(\phi/2\pi) - 2\Delta \ell d^2 + \Delta \ell dp}{\ell p - \ell d + \Delta \ell p - 2\Delta d} \quad \left\{ \begin{array}{l} (1.10) \\ (1.11) \end{array} \right.$$

しかし、条件式 (1.9), (1.10), (1.11) は同時に成立しない。そこで、本発明では、式 (1.5) において縞次数の増加に伴って最も影響が大きいと思われる n^2 の係数項を 0 とすることを考えて条件 (1.9) を用いて

$$\Delta \ell = \frac{(\ell dp - \ell np^2)(\phi/2\pi)}{d^2 - dnp - dp + np^2(\phi/2\pi)} \quad (1.12)$$

となる。

式 (1.9) へ式 (1.12) を代入して Δd を求めると

$$\Delta d = \frac{(dp - np^2)(\phi/2\pi)}{d - np - p + p(\phi/2\pi)} \quad (1.13)$$

となる。

式 (1.12), (1.13) によって任意の位相に対する格子 G の移動量、光源 S の移動量 $\Delta l, \Delta d$ がそれぞれ与えられる。

ここで、上記両式には縞次数を表す n が含まれている

格子 G と光源 S の移動量 $\Delta l, \Delta d$ をそれぞれ求めることにした。

式 (1.4) へ式 (1.9) と (1.3) を代入して分母をばらい Δl について解くと、

が、実際には n に適当な数値 (1, 2, 3, ...) を代入した $\Delta l, \Delta d$ を用いることとなり、その用いた n の値に対応する縞次数付近が最も誤差が小さくなる。

この因子 n と縞次数 n とを区別するため、式 (1.12), (1.13) 中の n を m と書き改め、

$$\Delta \ell = \frac{(\ell dp - \ell mp^2)(\phi/2\pi)}{d^2 - dmp - dp + mp^2(\phi/2\pi)} \quad (1.14)$$

$$\Delta d = \frac{(dp - mp^2)(\phi/2\pi)}{d - mp - p + p(\phi/2\pi)} \quad (1.15)$$

とした。

との誤差が 1 縞の 1/100 (すなわち $\pi/50$) 以内であれば計測結果に支障をきたさないものとした。

実体格子型のモアレ法に本発明方法による位相シフトを導入することにより、測定点の密度を増し、モアレ縞 1 周期の 1/40 ~ 1/100 程度の分割が可能となる。

本発明方法によって得られる位相 ϕ' は、第 2 図より、

本発明では、実験によって得られる位相と正規の位相

$$\phi' = \frac{(hn' + \Delta \ell - hn) \cdot 2\pi}{hn+1 - hn} \quad (1.16)$$

となる。

したがって、この場合に生じる位相誤差 $\Delta \phi$ は

$$\Delta \phi = \phi' - \phi = \frac{(hn' + \Delta \ell - hn) \cdot 2\pi}{hn+1 - hn} - \phi \quad (1.17)$$

となる。式 (1.4) は、この式 (1.17) において $\Delta \phi = 0$ としたものである。

7

ここで、この位相誤差 $\Delta \phi$ が計測結果に支障をきたさないためには、

$$\Delta \phi < |\pi/50| \quad (= \text{最大許容誤差}) \quad (1.18)$$

の条件が満たされねばならない。

しかしながら、 $\Delta \phi$ は多くのパラメータを含んでいるので式 (1.18) の条件を満たす範囲を定量的に知ることは困難である。実際には、多くのシミュレーションにより、式 (1.14)、(1.15) を用いれば、広範囲、高繰回数にわたって位相誤差 $\Delta \phi$ は最大許容誤差の $1/1000 \sim 1/100$ であることを確認した。

本発明方法の実施に際し、3次元座標の算出は、位相

$$h_n - h_{n-1} = \frac{l \, dp}{(d - np + p)(d - np)} \quad (2.1)$$

また、 n 次と $(n+1)$ 次の縞間隔は

$$h_{n+1} - h_n = \frac{l \, dp}{(d - np - p)(d - np)} \quad (2.2)$$

ここで、式 (1.1)、(2.1) を用いて

$$0 \leq z_i - \frac{l \, np}{d - np} < \frac{l \, dp}{(d - np + p)(d - np)} \quad (2.3)$$

を満たす $n (= i)$ を求める。第3図と式 (2.2) の関係により

$$\begin{aligned} \phi_i &= \frac{(z_i - h_i) \cdot 2\pi}{h_{i+1} - h_i} \\ &= \frac{\{z_i(d - ip) - l \, ip\} (d - ip - p) \cdot 2\pi}{l \, dp} \end{aligned} \quad (2.4)$$

となる。

格子Gを基準としたときの、物体形状の位相分布を $\phi_g(x, y)$ とすると、 $\phi_g(x, y)$ は、物体上の基準面から物体形状の位相分布 $\phi_o(x, y)$ に、格子から物体上の基準面までの位相差 $\phi_i + 2\pi i$ を加えたものであるから、

$$\phi_g(x, y) = \phi_o(x, y) + \phi_i + 2\pi i \quad (2.5)$$

計算において物体の凹凸は自動的に判別されているが、位相を座標に換算する際に繰回数を知る必要がある。

繰回数を決定する方法を、第3図を参照して説明する。

測定物体Obj上の、格子Gに一番近い点を基準として物体形状の位相分布 $\phi_o(x, y)$ を計算し、次にその基準面と格子Gとの間の距離 z_i を位相に換算して、それを $\phi_i + 2\pi i$ とする。 $\phi_i + 2\pi i$ の算出は次のように行う。

10 $(n-1)$ 次と n 次の縞間隔は

ϕ_g を 2π で割ることによって物体上の点 (x, y) に対応する繰回数 $n(x, y)$ とその面からの位相 $\phi(x, y)$ が求まり、式 (2.5) は

$$\phi_g(x, y) = 2\pi n(x, y) + \phi(x, y) \quad (2.6)$$

と変換される。

第3図より、物体上の点 (x, y) における基準面(格子面)からの距離 $z(x, y)$ は

$$\begin{aligned} z(x, y) &= h_n + (h_{n+1} - h_n) \cdot (\phi / 2\pi) \\ &= \frac{l \, np}{d - np} + \frac{l \, dp \cdot (\phi / 2\pi)}{(d - np - p)(d - np)} \end{aligned} \quad (2.7)$$

与えられ、式 (2.7) 中の n 、 ϕ に、式 (2.6) 中の $n(x, y)$ 、 $\phi(x, y)$ をそれぞれ代入することにより、 $z(x, y)$ が得られる。

画像処理によって算出される x, y 座標は画素単位であるからこれに拡大率を掛け合わせて実際の長さに変換さ

なければならない。 x, y 座標の原点は第3図においてカメラCaの光軸上にある。格子面上での倍率 m は、画像出力装置のコマンドを利用して x, y 方向既知の画素数で、格子面上の方眼を映し出すことによって得られる。

ここで、画素面の座標系を (x_0, y_0) 、格子面上の座

9

標系を (x_g, y_g) とおくと

$$x = mx_0$$

$$y = my_0$$

(2.8)

$$x = \frac{x_g (l + z)}{l}$$

$$y = \frac{y_g (l + z)}{l}$$

と表され、物体の3次元座標が求まる。

このようにして物体(測定対象)の3次元座標が求まれば、これをCRT上、或は、プロッタによりワイヤフレームモデルとして前記物体を描かせることにより、この測定対象を三次元的に表現することができる。

次に、本発明方法を実施するための装置の一例およびそのシステム構成について第4図、第5図により説明する。

本発明方法を実施するモアレ装置では、光線(S)にハロゲンランプ(100V/650W)を使用し、光源駆動機構部(M)にはマイクロメータを取り付け、1/100mm単位で水平面上を移動できるようになっている。また、光源Sは、カメラCaの焦点位置にその光源Sの中心位置を合わせられるように高さ方向に調節できるようになっている。ここでマイクロメータの代りにステップモータやピエゾ素子を用いることもできる。

格子(G)は、一例として、ピッチ0.4mm、格子部の平面大きさを200×290mmに形成した。この格子Gは、ピッチ0.4mmの長ネジに直径0.2mmの糸を張り渡し、反射率の低い塗料で塗装することにより製作した。この格子Gはガラス板や金属板等に多数のスリットを形成させて製作することもできる。

格子Gは格子枠F内に組み込まれ、格子枠内の水平移動機構によって当該格子Gを面内で移動でき、モアレ縞の平均化処理を行うようになっている。また、格子枠Fには4本の連結棒Lを取付けて支え、この連結棒Lを回転させることによって、前記格子を垂直方向に、ダイヤルゲージDを用いてチェックしながら1/100mm単位で移動できるように構成されている。

一方、光源Sと観察点(カメラCa)の距離は70~300mm、また、格子Gと観察点(カメラCa)の距離は60~320mmの範囲で調節でき、感度、物体の大きさに応じて可変できるようになっている。このように形成した装置により得られる縞間隔はおよそ0.3~1.8mmである。

上記装置のシステム構成を第5図のフローチャートに示す。

CCDカメラCaより得られた256×256画素の画像データは画像入出力装置51(アストロデザイン社、IP4004)によって256階調にAD変換され、それと接続されているパーソナルコンピュータ52(NEC、PC-9801)によって、

10

第3図から、深さzの位置にある物体上の点(x, y)は

(2.9)

10 フロッピーディスクに光強度分布データとして取り込まれる。そして、得られた、位相0, $\pi/2$, π , $3\pi/2$ の4つのデータはコンピュータで位相計算がなされ、式(2.7), (2.9)によって3次元座標が得られる。これによりCRT上に、またはプロッタでワイヤフレームモデルを表示するための出力をさせることができる。

実際には、測定物体の大きさに合わせてカメラCaの位置を決める。次に、光源Sの中心とカメラCaの焦点の位置合わせを行なう。

光源SとカメラCaの距離は、測定に適当な縞間隔となるように設定する。

格子Gと光源Sのシフト量 Δl , Δd はあらかじめ式(1.14), (1.15)により4種類の位相について算出しておき、双方を4回シフトさせ、モアレ縞画像をカメラCaに取り込む。その際、格子Gを面内で移動させてモアレ縞の平均化処理を行う。

【発明の効果】

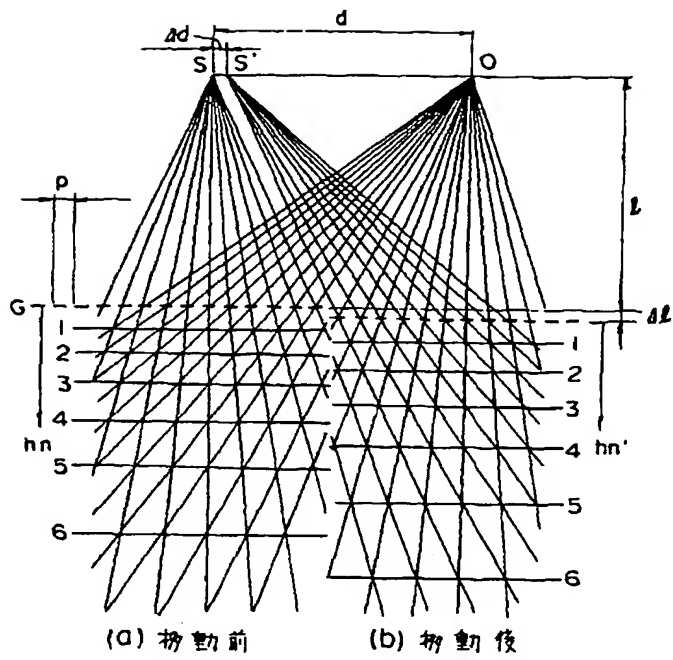
本発明は以上の通りであって、従来、実体格子型のモアレ法においては、位相シフト法の導入が困難であるとされていたが、本発明方法により、格子面の垂直移動と光源又は観察点の水平移動を同時に行って、各次数の縞の位相をほぼ揃った状態で位相シフトができるため、測定対象に対する測定点の密度を増やし、モアレ縞一周当たり1/40~1/100程度の分割をするから、きわめて高感度の三次元測定が可能になり、また、物体の凹凸の判定も容易にできることとなる。

【図面の簡単な説明】

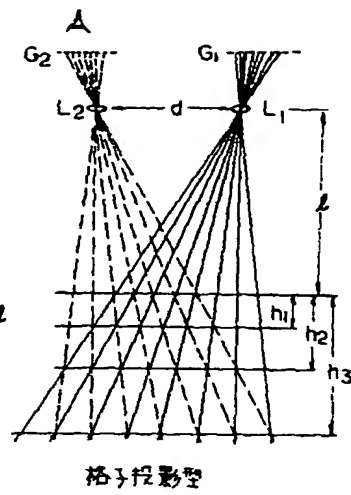
第1図は本発明方法の測定原理を示す模式図で、実体格子型のモアレ法における縞位相のずれを示す正面図、第2図は本発明方法による位相シフトの一例を示す模式図で、n次の縞の移動の様子を示す正面図、第3図は本発明方法における三次元座標の算出例を示す模式的概念図、第4図は本発明方法を実施するための装置の概略構成の一例を示す斜視図、第5図は本発明方法の実施をする際のデータ処理の流れを示すシステムブロック図、第6図は格子投影型のモアレ法を模式的に示す正面図、第7図は実体格子型のモアレ法を模式的に示す正面図である。

S……光源、G……格子、Ca……カメラ、 Δl ……格子Gのシフト量、 Δd ……光源Sのシフト量

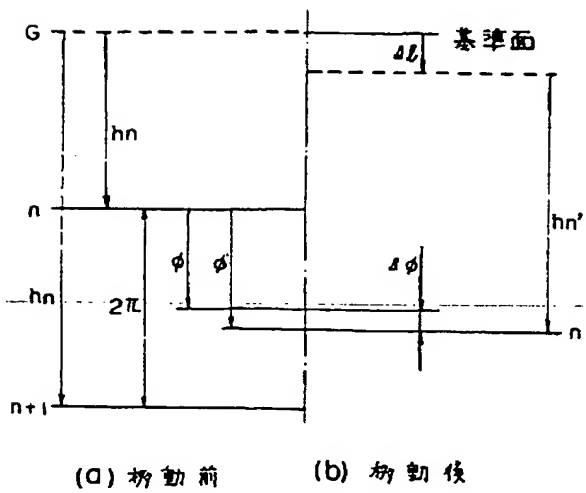
【第1図】



【第6図】



【第2図】



【第4図】

